

計器用サーボ機構の特性に およぼす非線形要素の影響

森 本 勲・斎 藤 周 次
高 梨 良 一・安 濃 恒 友

工 学 部 電 子 工 学 科

緒 言

実際のサーボ機構の特性を、正確に解析することはほとんど不可能である。計器用サーボ機構を設計する場合、各要素の特性を、非線形または変常数的にあつかうと、これ等を組合せた制御系全体の特性を、数学的に求めることは極めて困難である。

このような場合に、種々の近似計算等によって解明しようとする試みが行なわれるが、近似度を高めようとすれば極めて複雑なものとなる。しかし多少の誤差が許容される場合、アナログ計算機によって比較的手軽に各種パラメータを変更させて、それぞれの場合に対する応答を求め、その推移の状態を知ることができる。

本報では、計器用サーボ機構の特性におよぼす非線形要素の影響を研究するために、その一例として試作した自動平衡形記録計を用いて、実際に生ずる問題点を検討した。また、アナログ計算機によって、このサーボ機構をシミュレートして、その特性におよぼすバックラッシュの影響と、補償要素の補償効果を明らかにしたのでその概要を報告する。

1 計器用サーボ機構の特性におよぼす非線形要素の影響

計器用サーボ機構を設計する場合、これまでのやり方は、線形の制御理論で近似計算し、その結果から各制御要素の大略の値をきめて試作し、さらにそれを手直しすることによって特性の向上をはかる方法が多かったようである。

このような方法で問題となるのは、非線形要素が、系の特性にどのような影響をおよぼすかである。計器用サーボ機構の主な非線形要素としては、(1)増幅器の飽和、(2)増幅器の時間遅れ、(3)モータの非線形摩擦、(4)モータの非線形抵抗、(5)ギヤのバックラッシュ、(6)負荷の非線形摩擦、(7)ポテンシオメータの *granularity* 等があげられる。従来は、これらの非線形要素のうち、比較的系の特性に大きな影響をもつと考えられる、一つ、または二つだけを残し、他は無視して考察を行なったものが多い。⁽¹⁾ 本研究では、このような省略を少なくし、(1)、(2)、(3)および(5)の四種の非線形要素を含む系について検討した。

この場合、(1)、(2)、(3)については、一定の条件を考えて、その特性は変わらないものとし、(5)については、その値を種々に変えて考察した。つぎに、これらの非線形要素が系におよぼすと考えられる影響について述べる。

増幅器については、制御系の速応性の向上と、定常偏差の軽減をはかるため、系の利得を上げれば、実際上線形とみなせる範囲はせまくなり、比較的小入力で飽和現象を生ず

る。また、チョッパ式の増幅器においては時間遅れが生ずる。この飽和値は、速度、加速度に対する要求に応じうるように定めるべきであろう。また、時間遅れが、系の電氣的、機械的時定数に比べて無視できる程小さい場合は問題ないが、無視できない場合は、チョッパのキャリア周波数を高くする等の方法によって、その影響を除くことができる。

サーボモータについては、一般のモータと同様、磁氣的、機械的に非線形特性を生ずるが、さらに小形直流モータの場合は、ブラシの影響等による非線形摩擦、非線形抵抗等は無視することができなくなる。計器用サーボ機構に使用するモータは、特にそのために設計したものをを使用することは少く、一般に市販されている規格品を用いることが多いので、これらの特性や、他の構成要素の特性との関連等を考慮して選択しなければならない。

バックラッシュの幅が極端に大きな場合は、特性に悪影響をおよぼすことは明白であるが、微少なバックラッシュ幅をもつ場合、その幅だけモータは無負荷運転の状態となり、バックラッシュがない場合に比べて、モータの起動は容易となる。この現象が、系の特性にどのような影響をおよぼすかが問題となり、一概にバックラッシュのない場合の特性が最も良いとはいえない。また、理論的にまたは実際に最も良い特性を得るバックラッシュの幅がきまっても、特定のバックラッシュ幅をもたせることは困難であり、また、経年的な変化、環境による変化等を考えると、その値を維持することは困難である。したがって、最良の特性に近い総合特性を得るようなバックラッシュ幅の許容範囲を定めうることが望まれる。本研究においては、主としてこの点に重点をおいている。

計器用サーボ機構の場合、記録方法が光、熱、ペン等による場合が多いので、負荷の非線形摩擦は、モータのそれに比べて小さく、無視できることが多いのが現状である。しかし、無視しうる程度の負荷のために、その負荷に比べて、相対的に大容量のサーボモータを使用するような設計方針が、はたしてよいと言えるかということは検討に値する問題である。

また、ポテンシオメータの *granularity* によって、記録が直線的であるべき場合に、階段状になったり、振動を生じたり、記録された線が太くなるような現象を生ずる場合があるが、この点についてはポテンシオメータの分解能がよく、記録面に換算して、上記のような欠陥が無視できる程度のものを選ぶことによって解決できる。

以上の如く、非線形要素による問題点は数多くあるが、ここではバックラッシュの幅が変動することによって、全体の特性にどの程度の影響をおよぼすかを検討し、その結果にもとづいて、その許容されるべき範囲を明らかにすることを試みた。

すなわち、計器用サーボ機構として要求される諸条件を満足させうるか否かを検討するためには、線形系の場合とは異なり、つぎのごとき種々の場合を考慮する必要がある。

- (a) 小振幅入力に対する過渡応答
- (b) 振幅を変化させた場合の過渡応答の変動
- (c) それぞれの振幅に対する周波数応答
- (d) これら諸特性に対する補償要素の効果

これらの特性を明確にする意味で、過渡応答については、特に、むだ時間、立上り時間(10[%]~90[%]) および行きすぎ量 [%] を、周波数応答については、振幅、位相特性のほかに、波形歪を主として検討した。

2. 実験用サーボ機構の構成

1 に述べたような非線形要素を含む実験用サーボ機構として、Fig. - 1 のごとき構成の自動平衡形記録計を用いた。その各部の構成、測定および伝達関数を Tab. - 1 に示す。

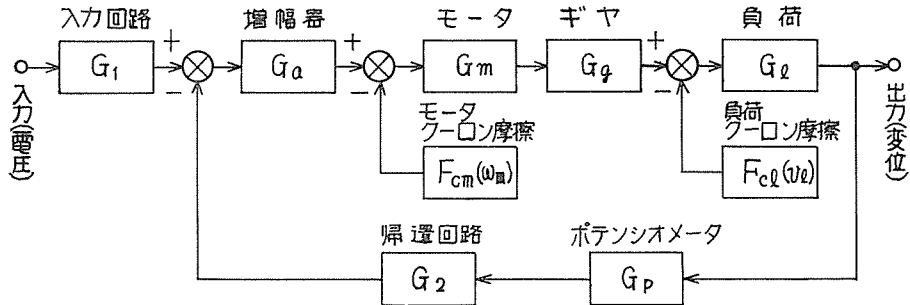


Fig. - 1 実験用サーボ機構の構成

なお、これらは特殊な部分品および構成をさけ、できるだけ一般性のあるものとした。

なお、負荷（プーリ、ワイヤ、ペン）の慣性モーメントおよび粘性摩擦係数は、モータのそれらに比べて小さく、また、ワイヤの伸びも小さいので、負荷を無視 ($G_l = 1$) した。

Tab. - 1 の伝達関数を用いて、Fig. - 1 をブロック線図で表わすと、Fig. - 2 のようになる。

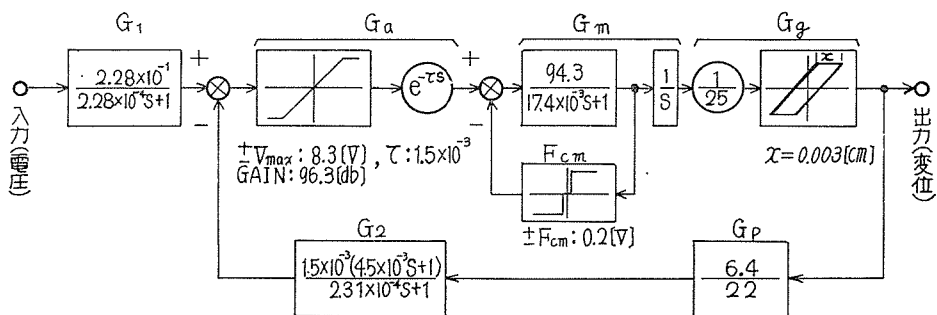
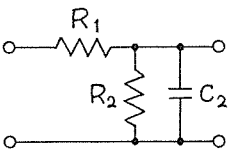
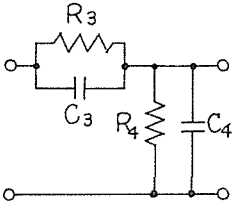
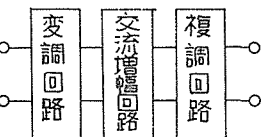
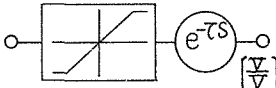
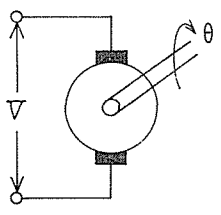
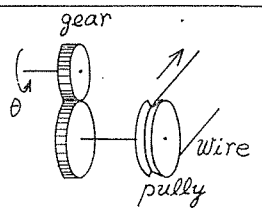
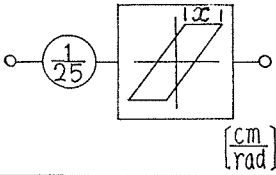
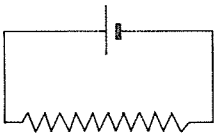


Fig. - 2 実験用サーボ機構のブロック線図($C_s: 3000[PF]$)

3. アナログ計算機によるシミュレーション

制御系をアナログ計算機でシミュレーションする場合、制御系の各構成要素の特性が明確であり、アナログ計算機の要素が、それらを完全にシミュレーションする能力を有するときは、制御系の特性と、アナログ計算機による結果とが、一致するのは当然である。

しかし、実際の場合には、制御系の構成要素を正確に測定することは困難な場合が多く、一方、アナログ計算機の要素は個数に制限があり、その特性においても限定されたも

	構 成	測 定 値	伝 達 関 数
G_1		$R_1 : 10 \text{ [K}\Omega\text{]}$ $R_2 : 294 \text{ [K}\Omega\text{]}$ $C_2 : 0.1 \text{ [}\mu\text{F}\text{]}$	$\frac{2.28 \times 10^{-1}}{2.28 \times 10^{-4}S + 1} \left(\frac{\text{V}}{\text{V}} \right)$
G_2		$R_3 : 1.5 \text{ [M}\Omega\text{]}$ $C_3 : \begin{cases} 1000 \text{ [PF]} \\ 3000 \text{ [PF]} \\ 5000 \text{ [PF]} \end{cases}$ $R_4 : 2.27 \text{ [K}\Omega\text{]}$ $C_4 : 0.1 \text{ [}\mu\text{F}\text{]}$	$\frac{1.5 \times 10^{-3}(45 \times 10^{-3}S + 1)}{2.31 \times 10^{-4}S + 1} \left(\frac{\text{V}}{\text{V}} \right)$ $(C_3 = 3000 \text{ [PF] の場合})$
G_a		増幅度: 96.3 [db] 最大出力電圧: 8.3 [V] 時間遅れ: 1.5 (m sec)	$\pm V_{\max}: 8.3 \text{ [V]}, \tau: 1.5 \times 10^{-3}$ GAIN: 96.3 [db] 
G_m		利得: $94.3 \left(\frac{\text{rad}}{\text{V-sec}} \right)$ 時定数: $17.4 \times 10^{-3} \text{ [SEC]}$	$\frac{94.3}{(17.4 \times 10^{-3}S + 1)S} \left(\frac{\text{rad}}{\text{V}} \right)$
F_{cm}		クーロン摩擦: 0.2 [V] (入力電圧に換算して)	$0 \text{ } (\omega_m = 0)$ $0.2 \text{ } (\omega_m \neq 0) \left(\frac{\text{V}}{\text{rad/sec}} \right)$ $(\omega_m: \text{回転速度})$
G_g		歯車比: 1/25 バックラッシュ幅: $3 \times 10^{-3} \text{ [cm]}$ (直線変位に換算して) プーリの半径: 1 [cm]	$x: 0.003 \text{ [cm]}$ 
G_p		印加電圧: 6.4 [V] 長 さ: 22 [cm]	$\frac{6.4}{22} \left(\frac{\text{V}}{\text{cm}} \right)$

Tab. - 1 Fig. - 1 の各要素の構成, 測定値および伝達関数

のである。ことに非線形要素を多く含む場合等においては、多少の誤差を生ずることはやむをえない。

ここでは、前節に述べたサーボ機構を、低速度形アナログ計算機を用いてシミュレーションしてみた。

時間換算係数、電圧換算係数を考慮した場合、入力電圧 $0.8[\text{mV}]$ のプログラミングの例を Fig. - 3 に示す。線形要素については、なるべく実際の値に一致させるようにし、

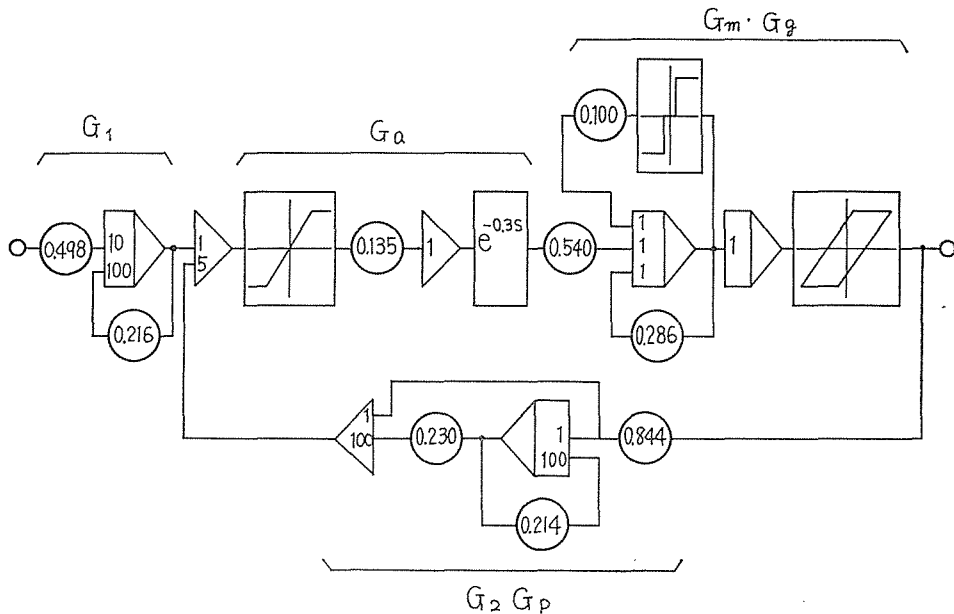


Fig. - 3

時間遅れ、バックラッシュ、増幅器の飽和およびモータのクーロン摩擦をシミュレーションするため、それぞれ固有の非線形要素を用いた。

4. 実測値とシミュレーションによる結果との比較

2 で述べた実際の系の特性と、3 のアナログ計算機によるシミュレーションの結果とを比較するために、入力電圧 $0.8[\text{mV}]$ (記録ペンの変位に換算して $4[\text{mm}]$) および入力電圧 $4[\text{mV}]$ (記録ペンの変位に換算して $20[\text{mm}]$) の場合について、それぞれの過渡応答を求めた。その結果を Fig. - 4, Fig. - 5 に示す。なお、Fig. - 4 においてはバックラッシュ幅を B.L とし、以降の図についても同様とする。Fig. - 4 において、実測値とシミュレーションによる結果の行き過ぎ量が、相違しているように見えるが、その差の大きい $C_s: 3000[\text{PF}]$ の場合でも、実際の系の記録ペンの変位に換算して $0.28[\text{mm}]$ 程度にすぎない。

Fig. - 4 の小振幅入力の場合は、時間遅れと加速度飽和の影響がめだち、Fig. - 5 のように振幅が大きくなると、速度飽和の影響がめだってくる。なお、Fig. - 4, Fig. - 5 に

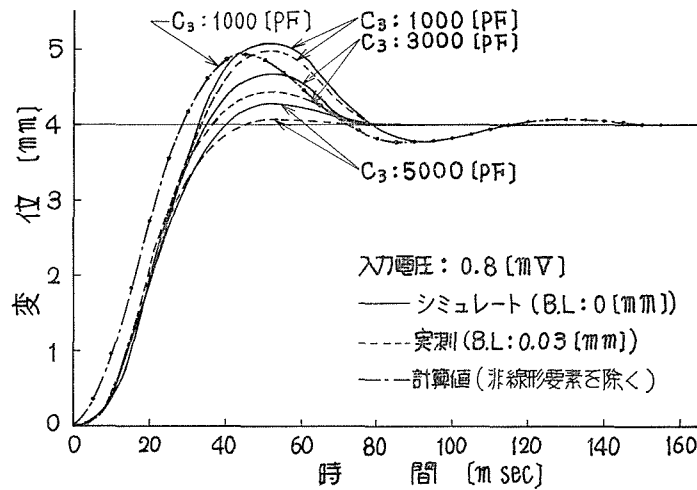


Fig. - 4

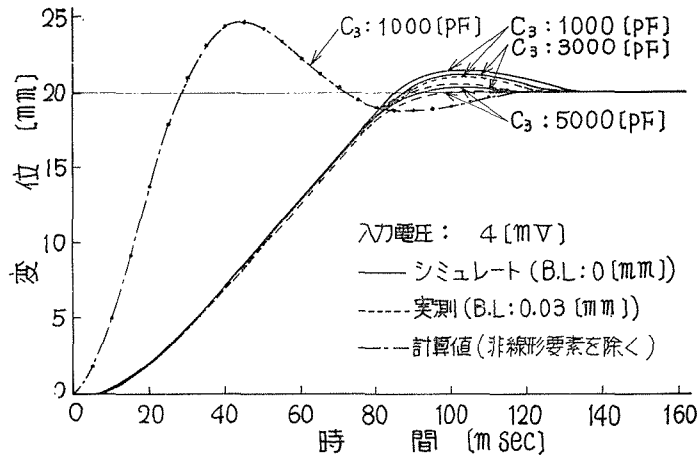


Fig. - 5

おける計算値は、増幅器の飽和および時間遅れ、モータのクーロン摩擦、ギヤのバックラッシュを除いた場合の線形計算の結果である。

また、Fig. - 6 には、入力電圧 4 [mV] の場合の周波数応答（振幅特性のみ）を示す。

実際の系では、バックラッシュ幅は、約 0.03[mm] であるので、シミュレーションする場合、バックラッシュ幅 0[mm] の他に 0.08[mm] の場合についても測定してみた。

以上のごとく、種々の条件のもとで測定した両者の特性が、すべての場合に比較的良好に一致している。したがって、このシミュレーションの方法が略々妥当なものであることを示しているといえる。

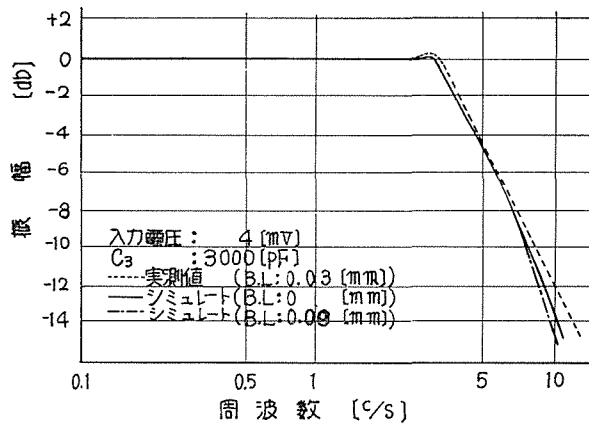


Fig. - 6

5 バックラッシュの許容範囲に関する考察

計器用サーボ機構の特性におよぼすバックラッシュ幅の影響を検討するために、アナログ計算機により、入力電圧 0.8[mV] の場合について、バックラッシュ幅を変え、それぞれの場合の過渡応答を求めた結果を Fig. - 7 に示す。

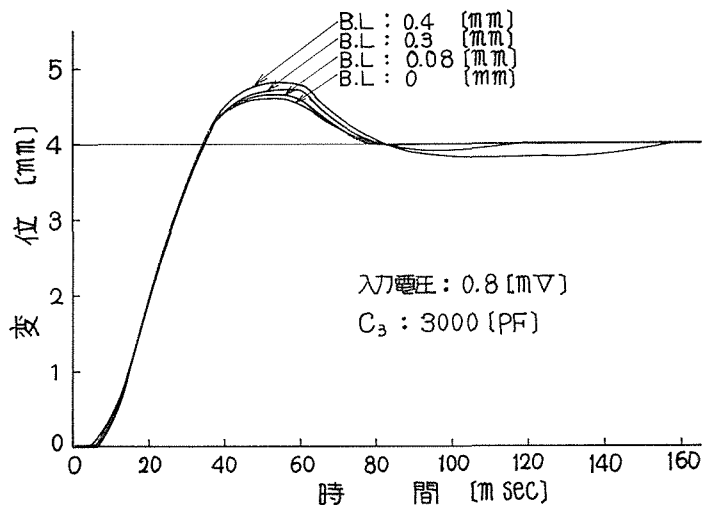


Fig. - 7

この結果をみると、バックラッシュ幅が大きくなれば、むだ時間と行きすぎ量が大きくなるが、立ち上がり時間はあまり大きくは変化せず、むしろ短くなる傾向を示していることがわかる。

バックラッシュ幅を変化させたときのむだ時間、パーセント行きすぎ量および立ち上がり時間を Tab. - 2 に示す。

Tab-2 バックラッシュ幅の変化によるむだ時間，パーセント行きすぎ量，立上り時間

バックラッシュ幅 [mm]	むだ時間 [msec]	パーセント行きすぎ量 [%]	立上り時間 [msec]
0	4.5	15.0	23
0.08	4.5	15.5	22
0.3	7.0	18.5	22
0.4	8.5	20.0	21

つぎに，帰還回路の効果について考察してみる。Fig.-4は，バックラッシュ幅0[mm]（実際の系では0.03[mm]）のとき， C_3 を変えた場合の過渡応答を示したものである。これと同様の特性を，バックラッシュ幅を変えた場合についてもアナログ計算機でシミュレーションし，その結果のバックラッシュ幅0.08[mm]の場合をFig.-8に，また

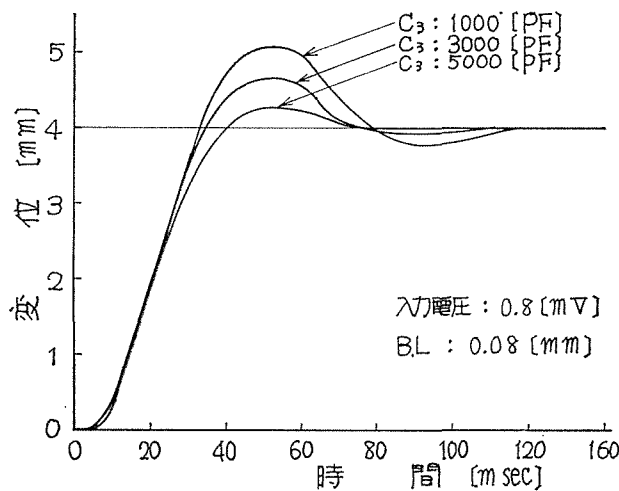


Fig.-8

0.3[mm]の場合をFig.-9に示す。Fig.-4，Fig.-8，Fig.-9からバックラッシュ幅をパラメータとして，立上り時間とパーセント行きすぎ量との C_3 による変化の状態を表わすと，Fig.-10のようになる。Fig.-10から立上り時間と行きすぎ量は相反する関係にあることは明らかである。これをある程度両立させようとするれば， C_3 は3000[PF]～5000[PF]の間の値を選ぶことになる，この範囲では，バックラッシュ幅はあまり大きな影響をおよぼさず，0[mm]の場合よりは，むしろ0.08[mm]の方がいくぶん優れた特性を示している。また，Fig.-4，Fig.-8，Fig.-9を比較してみると明らかなように，

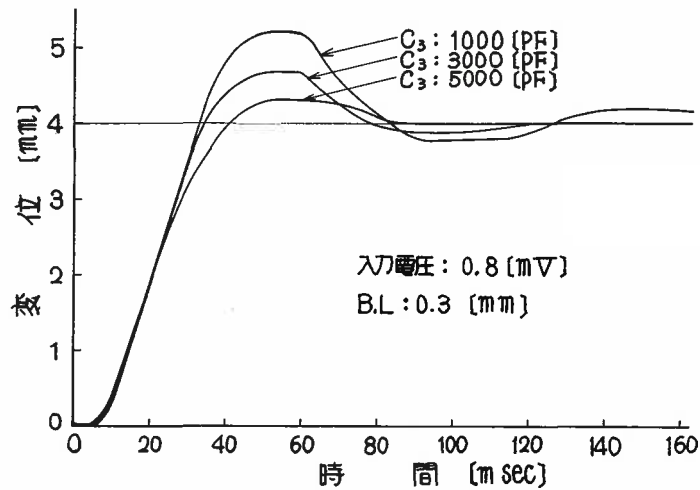


Fig. - 9

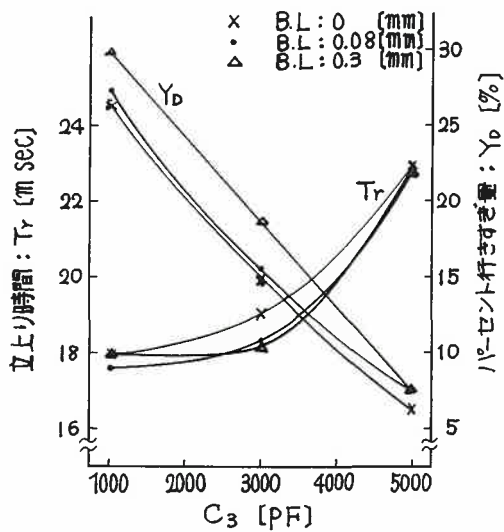
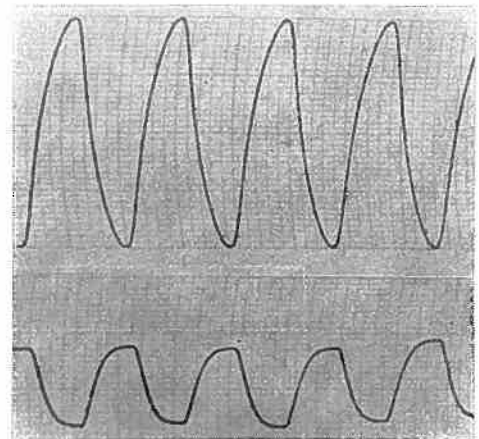


Fig. - 10



周波数 : 10 [c/s]
 入力電圧 : 4 [mV]
 C_3 : 3000 [PF]
 B·L : 0.3 [mm]

Fig. - 11

バックラッシュ幅が 0.3[mm] 程度になると波形が歪んでくることが認められる。このことは Fig.-11 の例に示すように、正弦波入力に対する出力波形をみると一層明白になり、この意味で計器用としては不適当であるといえることができる。

これまで述べたような条件のもとでは、0～0.08[mm] 程度のバックラッシュ幅であれば十分な性能を有するものといえることができるが、1 でも述べたように、経年的変化、使用状況の変動等を考えると製作の規準としては、これより狭い範囲にしばることが妥当であろう。

結 言

計器用サーボ機構の特性を検討する場合に問題となる非線形特性は、バックラッシュのほか、サーボモータ、負荷に関するもの、さらに、増幅器、ポテンシオメータ等々の構成要素にも存在するが、ここでは主として、バックラッシュ幅の許容範囲について論じた。これを決定するため、アナログ計算機によって実際の系をシミュレートして、種々の条件下における特性を検討した。その結果を総合すると、この場合にはバックラッシュ幅が0.1[mm]程度であれば、性能の低下が認められないことが明らかになった。

非線形特性の要素を数多く含む系について、一般的に解析することは困難であるが、本研究のごとき手法によって、各要素の製作誤差の許容範囲を決定することができれば、試行錯誤的な方法による、いわゆる手直し等の労を省いて、速やかに仕様に合致した製品をうるための有力な方法となるものと思われる。本論文が多少なりとも、計測器の生産の近代化に役立つことができれば幸である。

終りに、本研究に御協力をいただいた渡辺測器製作所に深謝の意を表します。

文 献

(1) 例えば

丸橋，久保，井川：飽和とバックラッシュを伴うサーボ系の解析，電気学会誌，83，11．(1963)

江尻：計器用キャリア形位置サーボ機構の微小振動，計測と制御，5，780，(1966)

The Effect of Nonlinear Components on
the Characteristics of a Servomechanism
Used in a Self-Balancing Instrument

Isao MORIMOTO, Shuji SAITO, Ryoichi TAKANASHI
and
Tsunetomo ANNO

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering

It is generally very difficult to investigate the characteristics of a servomechanism used in a self-balancing instrument because of nonlinearities of many components which are contained in the system.

In this paper, the effect of the nonlinear characteristics of the components, especially, of the variation of backlash width, used in a self-balancing instrument, is studied by the method of analogue computer simulation.

As an example, it is clarified that the allowable width of backlash existing in a self-balancing type recorder, which was manufactured for trial in this study, is from 0(mm) to 0.1(mm) under a certain condition.

This technique of simulation may be utilized to modernize the design and production of the measuring instruments and apparatus.